



УДК 621.515

**ОПТИМИЗАЦИЯ ОБРАТНОГО  
НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА  
ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА****OPTIMIZATION OF THE CENTRIFUGAL  
COMPRESSOR RETURN CHANNEL**

**Бубнов Александр Дмитриевич**, магистрант каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: alexandrbubnov21@rambler.ru, Тел.: +7(953)388-43-93.

**Блинов Виталий Леонидович**, канд. техн. наук, ст.преподаватель каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vithomukyn@mail.ru.

**Комаров Олег Вячеславович**, канд. техн. наук, доцент каф. «Турбины и двигатели», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: ov\_komarov@mail.ru.

**Alexander D. Bubnov**, Master student, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: alexandrbubnov21@rambler.ru, Ph.: +7(953)388-43-93.

**Vitaliy L. Blinov**, Ph.D. in Engineering, Senior Lecturer, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vithomukyn@mail.ru.

**Oleg V. Komarov**, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Department «Turbines and engines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: ov\_komarov@mail.ru.

**Аннотация:** В настоящей работе изложен подход к оптимизации формы лопаток обратного направляющего аппарата центробежного компрессора. Проведен сравнительный анализ двух вариантов проточной части компрессора. В ходе анализа сравнивались значения относительного политропного КПД компрессора, относительного коэффициента потерь полного давления, а также картины распределения линий тока в обратном направляющем аппарате.

**Abstract:** The approach to optimizing the shape of the return channel blades for centrifugal compressor is described in this paper. A comparative analysis of two compressors flow paths is carried out. Values of the compressor relative polytropic efficiency, the relative losses of the total pressure, as well as the distribution pattern of the streamlines in the return channel were compared during the analysis.

**Ключевые слова:** центробежный компрессор; проточная часть; обратный направляющий аппарат; лопаточный аппарат; рабочее колесо; многокритериальная оптимизация.

**Key words:** centrifugal compressor; flow path; return channel; blade row; impeller; multi-criteria optimization.

Усовершенствование рабочего колеса (РК) является общей практикой при проектировании центробежных компрессоров (ЦБК), в то время как для статорных элементов проточной части (ПЧ) не всегда применяются подобные процедуры. Это связано с тем, что диффузоры и обратные направляющие аппараты (ОНА) оказывают несущественное влияние на общую производительность центробежного компрессора по сравнению с РК. Однако, уменьшение потерь, относящихся к статорным элементам может существенно улучшить эффективность ступени ЦБК [1].

Настоящая работа посвящена оптимизации формы лопаток ОНА центробежного компрессора

выполненного в безлопаточном исполнении. Однако, изначально диффузор исходного варианта был выполнен в лопаточном исполнении. Этим объясняется то, что пик КПД исходной геометрии ПЧ находится не в расчетной точке. Исходной геометрией послужила ПЧ ЦБК, полученная при помощи собственного программного кода проектирования [2]. Лопатки РК – радиальные, цилиндрической формы. Численная модель компрессора построена с рядом допущений (осевой вход, не учитывались утечки, шероховатость поверхности, влияние входной и выходной улиток), что предопределило несколько завышенный КПД. В настоящей работе проводилась пространственная постановка оптимизации [3]. Форма профиля, как в корневом

сечении (Hub), так и в периферийном (Shroud) менялась независимо друг от друга. Профиль в каждом сечении строился по средней линии (кривая Безье третьего порядка) и заданному закону распределения толщины профиля. На рисунке 1 изображена параметризованная геометрия лопатки ОНА с соответствующими обозначениями переменных оптимизации. Цифрами 1, 2, 3 и 4 обозначены управляющие точки кривой Безье,  $\Phi_5$  – угловое положение управляющей точки 1 на заданном радиусе.

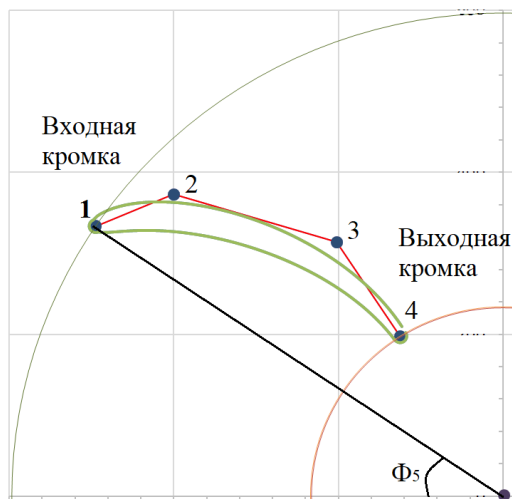


Рис. 1. Параметризованная геометрия исходной лопатки ОНА

В ходе оптимизации изменялись координата  $X$  управляющей точки 4, угловое положение  $\Phi_5$  точки 1, как для корневого сечения, так и для периферийного. Также в процессе оптимизации изменялись количество лопаток ОНА и меридиональные обводы, а именно протяженность поворотного колена, ширина канала на входе в ОНА и на выходе из него. Однако, следует отметить, что в результате оптимизации форма меридиональных обводов проточной части изменилась незначительно. Диапазоны переменных оптимизации сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Диапазоны переменных оптимизации

Параметр	Min	Max
Протяженность ПК, мм	0	20
Ширина канала на входе в ОНА	0.9	2
Угол образующей сечения shroud, град	85	89
Угловое положение т.1 (Hub), град	140	160
Угловое положение т.1 (Shroud), град	140	160
Координата $X$ т.4 (Hub), мм	-160	-100
Координата $X$ т.4 (Shroud), мм	-160	-100
Максимальная толщина профиля, мм	9	35
Положение макс. толщины профиля	0.1	0.9
Количество лопаток, шт	12	22

Анализ проводился в расчетной точке, соответствующей номинальному режиму работы компрессора. Критерием оптимизации была

выбрана максимизация КПД компрессора, как по статическим, так и по полным параметрам. При постановке задачи были наложены соответствующие ограничения по выходным параметрам (расход, мощность, степень сжатия). Так объемный расход на входе в ПЧ компрессора ( $400 < Q_1 < 500$ ) м<sup>3</sup>/мин, потребляемая мощность ( $N < 13500$ ) кВт, степень сжатия по полным параметрам  $\pi^* > 1,35$ , степень сжатия по статическим параметрам  $\pi > 1,37$ . На рисунке 2 представлено сравнение формы лопаток ОНА исходной и оптимизированной геометрии. Синим цветом изображен профиль исходного варианта, зеленым и красным цветом – профиль корневого и периферийного сечения соответственно. Из рисунка видно, что в результате оптимизации существенно изменился угол входа в ОНА. Это связано с тем, что исходный вариант изначально проектировался под лопаточный диффузор. В результате оптимизации наблюдается некоторое уменьшение входного лопаточного угла ОНА. К тому же поток в ПЧ компрессора имеет значительную неравномерность, что в свою очередь объясняет переменные лопаточные углы входа и выхода из ОНА, полученные в результате оптимизации. Положение максимальной толщины профиля, также было изменено в результате оптимизации. Для оптимизированной геометрии положение максимальной толщины профиля находится в центре профиля.

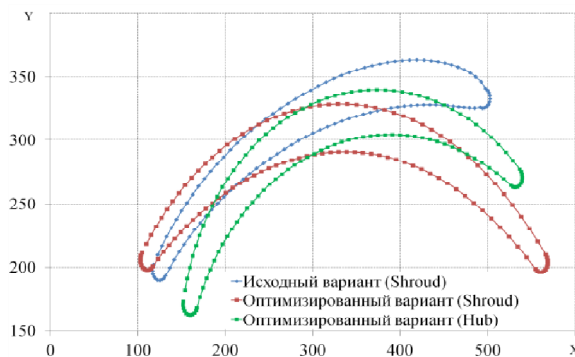


Рис. 2. Сравнение формы лопаток ОНА исходной и оптимизированной геометрии

В ходе оптимизации удалось повысить величину политропного КПД компрессора, как по статическим, так и по полным параметрам. Так для оптимизированного варианта значение политропного КПД по статическим параметрам в расчетной точке составило 87,0 %, а по полным параметрам – 93,4 %, в то время как для исходного варианта величина КПД составляла 85,5 % и 91,3 % по статическим и полным параметрам соответственно.

На рисунке 3 представлено сравнение значений относительного политропного КПД по статическим параметрам исходного и оптимизированного варианта ПЧ. По оси абсцисс

откладывается номер точки на характеристике компрессора. Точка 1 соответствует левой границе характеристики, точка 3 – расчетная точка, соответствующая, номинальному режиму компрессора, точка 5 соответствует правой границе характеристики. По оси ординат откладываются значения относительного политропного КПД по статическим параметрам, отнесенные к величине политропного КПД исходного варианта в расчетной точке.

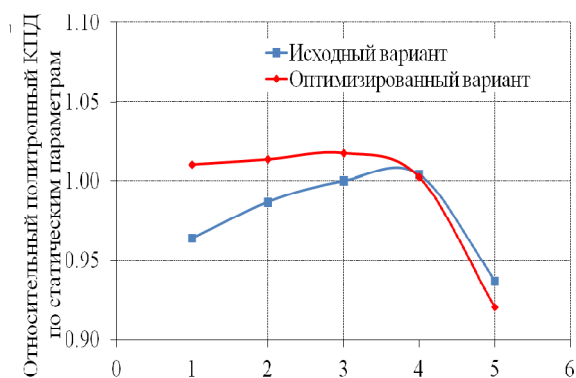


Рис. 3. Относительный КПД исходной и оптимизированной геометрии

Из рисунка 3 видно, что в результате оптимизации удалось повысить значение политропного КПД компрессора практически во всем диапазоне рабочих режимов, за исключением крайних правых точек характеристики, соответствующих области больших расходов. Также можно наблюдать, что пик КПД для оптимизированного варианта стал соответствовать расчетной точке. Это говорит о том, что на номинальном режиме работы компрессора обтекание лопаточного аппарата ОНА потоком газа стало более благоприятным.

На рисунке 4 представлено сравнение значений относительного коэффициента потерь полного давления исходной и оптимизированной геометрии.

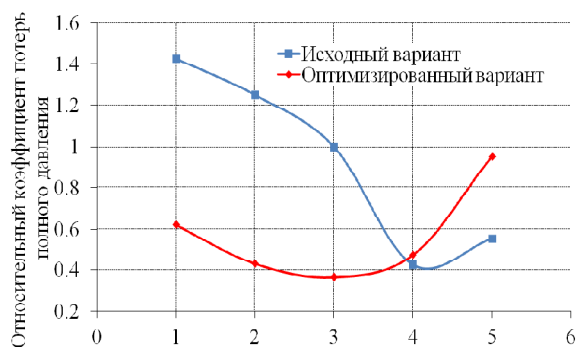


Рис. 4. Сравнение относительного коэффициента потерь полного давления

По оси абсцисс откладывается номер точки на характеристике компрессора. Точка 1 соответствует левой границе характеристики, точка 3 – расчетная точка, соответствующая, номинальному режиму компрессора, точка 5 соответствует правой границе характеристики. По оси ординат откладываются значения относительного коэффициента потерь полного давления, отнесенные к величине коэффициента потерь исходного варианта в расчетной точке. Значение коэффициента потерь полного давления определялось по формуле:

$$\xi = \frac{P_{6T} - P_{5T}}{P_{5T} - P_{5S}}, \text{ где} \quad (1)$$

$\xi$  – коэффициент потерь полного давления,  $P_{6T}$  – полное давление на выходе из обратного направляющего аппарата,  $P_{5T}$  – полное давление на входе в ОНА,  $P_{5S}$  – статическое давление на входе в ОНА. На рисунке 5 представлен обратный направляющий аппарат с соответствующими контрольными сечениями.

Из рисунка 4 видно, что в результате оптимизации, значения коэффициента потерь полного давления существенно уменьшились практически во всем диапазоне рабочих режимов, чем объясняется прирост эффективности компрессора. Однако, следует отметить, что количество лопаток ОНА в результате оптимизации уменьшилось, что в свою очередь также могло повлиять на уровень потерь полного давления.



Рис. 5. ОНА исходной геометрии с контрольными сечениями

Таким образом, была оптимизирована лопатка обратного направляющего аппарата ЦБК. В результате оптимизации была получена пространственная лопатка ОНА с переменными углами входа и выхода, за счет чего обеспечивается более оптимальное обтекание по

высоте лопатки. На рисунке 6 представлена картина распределения линий тока в ОНА для исходной и оптимизированной геометрии. Из рисунка видно, что в случае оптимизированного

варианта ПЧ наблюдается более благоприятное обтекание потоком лопатку ОНА.

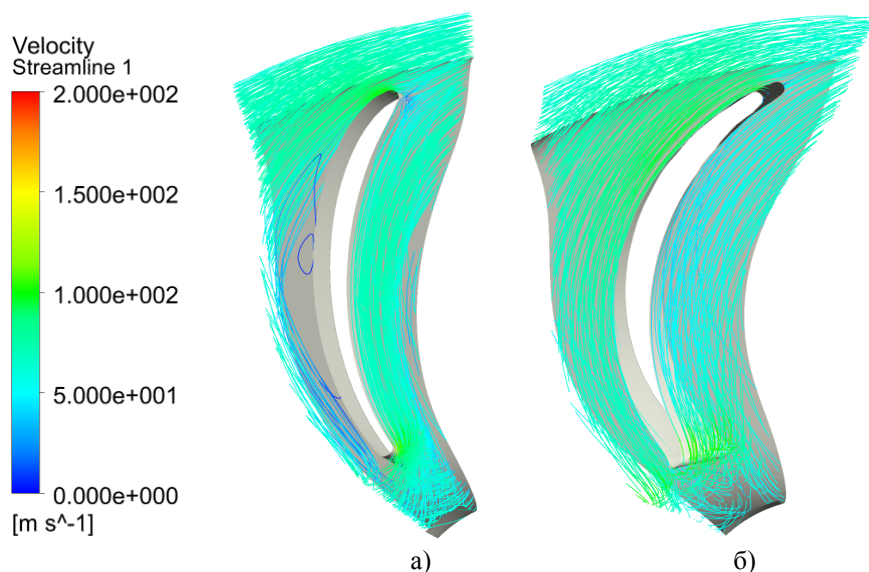


Рис. 6. Картина распределения линий тока в ОНА в случае (а) исходной и (б) оптимизированной геометрии

Также за счет пространственной формы лопатки ОНА и изменения положения максимальной толщины профиля удалось обеспечить благоприятное обтекание не только в области входной кромки, но и по всей поверхности лопатки, тем самым избавиться от области срыва на номинальном режиме работы.

Помимо прироста политропного КПД и уменьшения коэффициента потерь полного давления, оптимизированный вариант обладает несколько меньшей по расходу шириной диапазона рабочих режимов по сравнению с исходным вариантом, однако этот недостаток можно устранить путем оптимизации обводов ПЧ ЦБК и лопаточного аппарата РК. Также помимо перечисленных выше постановок оптимизации, ведутся работы по оптимизации ЛД и поиску оптимальной густоты лопаточных аппаратов компрессора [4].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fabio De Bellis, Emanuele Guidotti, Dante Tommaso Rubino. Centrifugal compressors return channel optimization by means of advanced 3-D computational fluid dynamics // Downstream technology solutions. 2015. С. 1-9.

2. Бубнов А.Д., Винтер М.Ю., Блинов В.Л., Комаров О.В. Проектирование проточной части центробежного нагнетателя природного газа // Энергетика, электроника и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы IV российской молодежной научной школы-конференции. В 2 т. Т. 2/ Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «ЦРУ», 2016. – 435 с.

3. Бубнов А.Д., Винтер М.Ю., Блинов В.Л., Комаров О.В. Проектирование и многокритериальная оптимизация проточной части центробежного газового компрессора // X Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации»: сборник научных трудов в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – Часть 2. – С. 71 – 73.

4. Бубнов А.Д., Винтер М.Ю., Блинов В.Л., Комаров О.В. Определение оптимальной густоты лопаточного аппарата центробежного компрессора // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием. Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 742 с.